

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	3
1.1	Tratamiento de aguas residuales	3
1.2	Tratamientos biológicos de aguas residuales	5
1.2.1	Transformaciones bioquímicas	5
1.2.2	Medios bioquímicos	6
1.2.3	Configuración del biorreactor	7
1.2.4	Microorganismos que intervienen en los tratamientos biológicos	7
1.3	Tecnologías de tratamiento anaerobio de aguas residuales	8
1.3.1	Digestores anaerobios	10
1.3.2	Filtros anaerobios (USSB, <i>upflow static sludge bed</i>)	11
1.3.3	Reactores anaerobios de flujo ascendente (UASB, <i>upflow anaerobic sludge blanket</i>)	11
1.3.4	Biorreactores anaerobios de membranas (AnMBR, <i>anaerobic membrane bioreactor</i>)	12
1.4	Procesos implicados en el tratamiento anaerobio de aguas residuales	16
1.4.1	Hidrólisis	16
1.4.2	Acidogénesis	18
1.4.3	Acetogénesis	18
1.4.4	Metanogénesis	19
1.4.5	Sulfurogénesis	20
1.5	Parámetros que afectan los procesos biológicos anaerobios	25
1.5.1	Temperatura	26
1.5.2	pH	28
1.5.3	Tóxicos e inhibidores	29
1.5.4	Nutrientes	29
1.5.5	Tiempo de retención celular	30
1.5.6	Agitación	31
1.6	Modelación matemática en el tratamiento de aguas residuales	32
1.6.1	Modelación matemática de los procesos biológicos	34

1.6.1.1	Cinética del crecimiento microbiano	35
1.6.1.2	Estequiometría y cinética de los procesos biológicos	41
1.6.1.3	Formato y notación	43
1.6.2	Modelos matemáticos para el sistema de fangos activados	46
1.6.3	Modelos matemáticos para la digestión anaerobia	49
1.6.3.1	Modelo propuesto por Costello y colaboradores	50
1.6.3.2	Modelos propuestos por Siegrist y colaboradores	51
1.6.3.3	Modelo propuesto por Münch y colaboradores	53
1.6.3.4	<i>Anaerobic Digestion Model No. 1</i> (ADM1)	54
1.6.4	Modelos matemáticos para los sistemas de tratamiento anaerobio que incluyen los procesos de sulfurogénesis	55
1.6.4.1	Modelo propuesto por Gupta y colaboradores	56
1.6.4.2	Modelo propuesto por Fomichev y Vavilin	56
1.6.4.3	Modelo propuesto por Kalyuzhnyi y colaboradores	57
1.6.4.4	Modelo propuesto por Knobel y Lewis	58
1.6.4.5	Extensión del modelo ADM1 con procesos de reducción de sulfato	60
1.6.4.6	Modelo propuesto por Lizarralde y colaboradores	60
1.6.4.7	Modelo propuesto por Frunzo y colaboradores	61
1.6.5	Modelación de EDAR completas	62
1.7	Modelo BNRM (<i>Biological Nutrient Removal Model</i>)	64
1.7.1	Componentes del modelo	66
1.7.2	Ecuaciones de continuidad	67
1.7.3	Procesos del modelo	70
1.7.3.1	Procesos gobernados por la cinética	70
1.7.3.2	Procesos gobernados por el equilibrio	71
1.8	<i>Software</i> de simulación DESASS	73
1.9	Calibración de los modelos matemáticos de tratamiento de aguas residuales	75
1.9.1	Metodologías de calibración	76
1.9.1.1	Calibración en estado estacionario	76
1.9.1.2	Calibración dinámica	77
1.9.1.3	Calibración <i>off-line</i>	77
1.9.2	Análisis de sensibilidad e identificabilidad del modelo	77
1.9.3	Protocolos de Calibración	80
1.9.3.1	Protocolo de calibración STOWA	80
1.9.3.2	Protocolo de calibración BIOMATH	82
1.9.3.3	Protocolo de calibración WERF	83

1.9.3.4	Protocolo de calibración HSG	84
1.9.4	Calibración de modelos anaerobios	86
1.9.5	Validación de los modelos matemáticos de tratamiento de aguas residuales	87
2.	OBJETIVOS	91
2.1	Objetivo general	92
2.2	Objetivos específicos	92
3.	MATERIALES Y MÉTODOS	97
3.1	Planta SAnMBR a escala demostración	97
3.1.1	Elementos que componen la planta SAnMBR	98
3.1.1.1	Rotofiltro (RF)	98
3.1.1.2	Tanque de regulación (TR)	99
3.1.1.3	Reactor anaerobio (RAn)	100
3.1.1.4	Tanque de membranas (TM)	101
3.1.1.5	Tanque CIP	102
3.1.1.6	Sistema de impulsión de agua y de fango	103
3.1.1.7	Sistema de distribución de biogás	103
3.1.2	Descripción de la operación de la planta SAnMBR	104
3.1.3	Instrumentación de la planta SAnMBR	106
3.2	Montajes experimentales para la calibración de los parámetros del modelo	108
3.2.1	Montaje experimental en botellas	109
3.2.2	Montaje experimental en reactores cerrados	110
3.2.3	Montaje experimental en reactores herméticos	112
3.2.4	Metodología para la obtención y preparación de muestras	115
3.2.4.1	Toma de muestras de fango de la planta SAnMBR	115
3.2.4.2	Llenado de los reactores de calibración con el fango	115
3.2.4.3	Inyección de los reactivos a los reactores de calibración	115
3.2.4.4	Toma de muestras de fango de los reactores de calibración	116
3.3	Métodos analíticos	118
3.3.1	Seguimiento de la planta SAnMBR	118
3.3.2	Seguimiento de los ensayos de calibración	119

4. MODELO MATEMÁTICO DE LOS PROCESOS BIOLÓGICOS LLEVADOS A CABO POR LAS BACTERIAS SULFATORREDUCTORAS _____	123
4.1 Componentes del modelo _____	127
4.1.1 Componentes solubles, S _____	127
4.1.2 Componentes particulados, X _____	128
4.2 Materiales a conservar _____	129
4.3 Procesos del modelo _____	131
4.3.1 Procesos gobernados por la cinética _____	132
4.3.1.1 Crecimiento de las bacterias sulfatorreductoras heterótrofas a partir de S_{VFA} y S_{Ac} _____	132
4.3.1.2 Crecimiento de las bacterias sulfatorreductoras autótrofas _____	135
4.3.1.3 Lisis de las bacterias sulfatorreductoras heterótrofas _____	138
4.3.1.4 Lisis de las bacterias sulfatorreductoras autótrofas _____	138
4.3.1.5 Desabsorción de las especies gaseosas H_2S y CO_2 _____	138
4.3.2 Procesos gobernados por el equilibrio _____	141
4.4 Matriz estequiométrica _____	144
4.5 Cinética del modelo _____	145
4.6 Incorporación del modelo desarrollado al modelo BNRM2 e inclusión en el programa DESASS _____	145
5. METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO _____	153
5.1 Análisis de sensibilidad del sistema en estado estacionario _____	155
5.2 Descripción de la metodología de calibración _____	162
5.3 Determinación del rendimiento de las bacterias sulfatorreductoras heterótrofas _____	163
5.4 Determinación de la constante de semisaturación para el sulfato _____	165
5.5 Determinación de la constante de semisaturación para el sustrato _____	167
5.6 Determinación de la velocidad máxima específica de crecimiento de las bacterias sulfatorreductoras heterótrofas _____	168
5.6.1 Estimación de la concentración de bacterias _____	170

5.7	Determinación de la velocidad de muerte de las bacterias sulfatorreductoras heterótrofas _____	172
5.8	Determinación del efecto de la temperatura en los parámetros cinéticos de las bacterias sulfatorreductoras heterótrofas _____	174
6.	CALIBRACIÓN DE LOS PARÁMETROS Y VALIDACIÓN DEL MODELO: RESULTADOS Y DISCUSIÓN _____	179
6.1	Operación y seguimiento de la planta SAnMBR _____	179
6.2	Calibración <i>off-line</i> de los parámetros del modelo matemático desarrollado _____	183
6.2.1	Rendimiento de las bacterias sulfatorreductoras heterótrofas (Y_{HSRO}) _____	184
6.2.2	Constante de semisaturación para el sulfato ($K_{\text{SO}_4, \text{HSRO}}$) _____	190
6.2.3	Constante de semisaturación para el acetato ($K_{\text{Ac}, \text{HSRO}}$) _____	194
6.2.4	Velocidad máxima específica de crecimiento de las bacterias sulfatorreductoras heterótrofas ($\mu_{\text{HSRO}, \text{Max}}$) _____	197
6.2.5	Velocidad de muerte de las bacterias sulfatorreductoras heterótrofas (b_{HSRO}) _____	203
6.3	Determinación de los parámetros del modelo utilizando métodos de optimización matemática _____	207
6.4	Análisis de sensibilidad del modelo calibrado _____	220
6.5	Validación del modelo matemático y de sus parámetros en la planta SAnMBR _____	222
6.5.1	Validación en estado estacionario _____	222
6.5.2	Validación en estado transitorio _____	224
7.	CONCLUSIONES _____	245
8.	BIBLIOGRAFÍA _____	253
9.	ANEXOS _____	273
9.1	Valores por defecto del análisis de sensibilidad de los parámetros del Modelo BNRM2a (Procesos anaerobios) _____	273
9.2	Resultados experimentales de los ensayos de citometría de flujo _____	275

9.3	Modelo matemático BNRM2 ampliado	279
9.3.1	Componentes del modelo	279
9.3.2	Ecuaciones de continuidad	280
9.3.3	Procesos del modelo	283
9.3.4	Matriz estequiométrica del modelo	284
9.3.5	Cinética del modelo	288